

Haben elektrische Straßenfahrzeuge eine Zukunft?

Canders, Wolf-Rüdiger

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2009 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.121-139



J. Cramer Verlag, Braunschweig

Haben elektrische Straßenfahrzeuge eine Zukunft?

WOLF-RÜDIGER CANDERS

Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen (IMAB), TU Braunschweig
Hans Sommerstr. 66, D-38106 Braunschweig

1. Einleitung

Elektromobilität hat eine lange Geschichte. Erste mit Motorkraft betriebene Fahrzeuge gab es schon vor der Erfindung des Otto- bzw. Dieselmotors, dies waren Elektrofahrzeuge. Dabei wurden durchaus schon Konzepte verfolgt, die auch heute populär sind. Bereits um die vorletzte Jahrhundertwende (Pat. Anmeldg. 1902) präsentierten Lohner und Porsche ein Elektrofahrzeug mit vier durch Radnabenmotoren angetriebenen Rädern ($P_{ges} = 10 \text{ kW}$, 1800 kg Batterie). Der weitere Verlauf der Geschichte ist bekannt: Infolge der Einführung der Verbrennungskraftmaschine, die sich auf einen leichten Kraftstofftank mit riesigem Energieinhalt (ca. 10 kWh/l) abstützen konnte, wurden die Elektro-Straßenfahrzeuge vollständig verdrängt. Dem Nutzer eines Fahrzeugs mit Verbrennungskraftmaschine konnte eine bis dahin nicht gekannte Mobilität zur Verfügung gestellt werden, die mit fortschreitender technischer Entwicklung und der Entwicklung der Infrastruktur spontane Fahrten sogar über Strecken von einigen hundert Kilometern innerhalb eines Tages ermöglichen. Erst während der ersten Ölkrise in den 70er Jahren wurde die Idee des Hybrid- und auch des Elektrofahrzeuges wieder aufgegriffen, aber danach mit fallenden Ölpreisen auch wieder verworfen. Heute ist die Situation wiederum durch die erkennbare Verknappung der Ölvorräte aber auch durch die Problematik gekennzeichnet, dass wir nennenswerte CO_2 Mengen aus der Nutzung fossiler Energierohstoffe in der Atmosphäre deponieren, die sich erkennbar auf das Klima auswirken. Hinzu kommt ein ungebremstes Bevölkerungswachstum mit gleichzeitig aufblühenden großen Volkswirtschaften in Süd- und Ostasien, die eine exponentiell ansteigende Nachfrage nach Energie und eine parallel hierzu ansteigende Produktion von CO_2 nach sich ziehen. Ein nicht zu unterschätzender Anteil des gesamten Energieverbrauchs und der Emissionen ist dem Straßenverkehr zuzurechnen.

Durch die politischen Weichenstellungen der Bundesregierung zur Emissionsreduktion [1] soll dieser Entwicklung Rechnung getragen werden, so dass das Thema Elektromobilität in das Integrierte Energie- und Klimaprogramm aufgenommen wurde. Seitdem wird dem Elektrofahrzeug, vor allem dem Elektro-

* Der Vortrag wurde am 13.02.2009 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

PkW, erhebliche Aufmerksamkeit in der Forschung gewidmet. Die folgenden Zitate mögen die neuen Zielsetzungen illustrieren:

1) Prof. Dudenhöfer (Center of Automotive Research Gelsenkirchen):

Um das Jahr 2025 werden keine Neuwagen mehr ohne Hybridisierung – sprich Elektromotoren verkauft!

2) Martin Winterkorn (VW):

Die Zukunft gehört dem Elektroauto – mit Strom aus der Steckdose;

aber am 12.2.09 sagt Winterkorn auch: Auch in 30 Jahren werden wir noch überwiegend mit Verbrennungsmotoren fahren.

Die in diesem Aufsatz angestellten Betrachtungen befassen sich vorwiegend mit reinen Elektrofahrzeugen, die als Endpunkt einer Entwicklung vom Fahrzeug mit Verbrennungsmotor über diverse Stufen der Hybridisierung anzusehen sind und die sicherlich nicht unmittelbar den Fahrzeugbestand substituieren werden. Die Energie für solche Fahrzeuge wird mit hoher Wahrscheinlichkeit aus einer chemischen Batterie kommen, sie könnte aber auch durch einen Wasserstoff-tank in Verbindung mit einer Brennstoffzelle bereit gestellt werden.

Ziel ist es, den heutigen Stand zu verdeutlichen und die Frage zu beantworten, welche Faktoren den wünschenswerten Übergang zum elektrischen Straßenverkehr beschleunigen könnten und welche sich nach wie vor bremsend auswirken und deshalb durch mühsame Forschungsarbeit überwunden werden müssen.

In einer konservativen Markteinschätzung von Bundesregierung, Wissenschaft und Industrie stellt sich der Übergang zur Elektromobilität wie folgt dar:

Tabelle 1: Anzahl von Fahrzeugen mit Hybrid- oder Elektroantrieb.

| Jahr | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|----------|---------|---------|---------|
| Konservatives Szenario (Bundesregierung) | 250 000 | 1,0 Mio | 2,5 Mio | 5,0 Mio |
| Progressives Szenario (RWE/Daimler, Sommer 2008) | 1,25 Mio | 3,7 Mio | 8,6 Mio | 15 Mio |

Ebenso haben sich weltweit diverse professionelle Marktforschungsinstitutionen mit der Thematik auseinandergesetzt, jedoch weichen auch diese Einschätzungen bereits für 2015 um mehr als 100% voneinander ab. Wie so oft ist davon auszugehen, dass diese Studien von Annahmen ausgehen, die dem Zweck der Studie entsprechend gesetzt wurden, so dass die meisten Aussagen hierzu in den Bereich der Kaffeesatzleserei einzuordnen sind.

2. Energiepolitische Randbedingungen

Elektrofahrzeuge ermöglichen die lokale Reduzierung des CO₂ Ausstoßes, reduzieren die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und verringern die Emission von Rußpartikeln, Giftstoffen, Klimagasen und Lärm. Diese Gesichtspunkte zeigen die Chancen, die durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen entstehen und werden im Folgenden näher beschrieben.

2.1. Reduzierung von Emissionen

Schlüssel für das Erreichen der in Europa beschlossenen Klimaziele [2] ist die Reduktion des globalen CO₂ Ausstoßes auf etwa ein Drittel des heutigen Ausstoßes. Berücksichtigt man die zunehmende Industrialisierung der Schwellenländer und den damit einhergehenden steigenden Energieverbrauch, so wird die Notwendigkeit der Energieeinsparung für industrialisierte Länder umso deutlicher. Unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums ergibt sich im Jahr 2050 ein zulässiger pro Kopf CO₂ Ausstoß von nicht mehr als 1 t pro Jahr. Für Deutschland bedeutet dies eine Reduzierung des CO₂ Ausstoßes um etwa 90%. Sollen die beschlossenen Klimaziele auch nur annähernd erreicht werden, muss der CO₂ Ausstoß in allen Bereichen reduziert werden [2, 3]. Dies gilt auch für den PKW-Verkehr, auf den sich in Deutschland rund 14% der CO₂ Emissionen zurückführen lassen.

Doch die durch den motorisierten Verkehr entstandenen Umwelteinflüsse gehen über die Emission von CO₂ hinaus, so dass sich durch die Elektromobilität ein Zusatznutzen hinsichtlich der Emission von SO₂, NO_x, CKWs sowie eine Reduktion indirekter Emissionen wie Ozonbildung, Feinstaub und Lärm ergibt.

2.2. Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern

Neben den Emissionen ist auch die begrenzte Verfügbarkeit des Erdöls ein Grund nach Alternativen zu suchen. Die aktuell vorliegenden Erkenntnisse zum derzeitigen und zukünftigen Weltenergiehaushalt gehen weitestgehend davon aus, dass der Anteil von Erdöl an der Primärenergieverteilung sein Maximum erreicht hat und kontinuierlich sinken wird [5]. Die Suche nach Alternativen zum Erdöl wird umso wichtiger, wenn man berücksichtigt, dass die zur Förderung notwendige Energie stetig steigt, ein deutliches Zeichen für die allmähliche Erschöpfung dieser Quellen. Bereits heute werden etwa 10% der Energie des Erdöls allein für dessen Förderung benötigt. Durch die Erschließung neuer Quellen wird sich dieser Trend fortsetzen. So werden beim Abbau von Ölsand bereits 30% des Energieinhaltes für die Förderung benötigt [4].

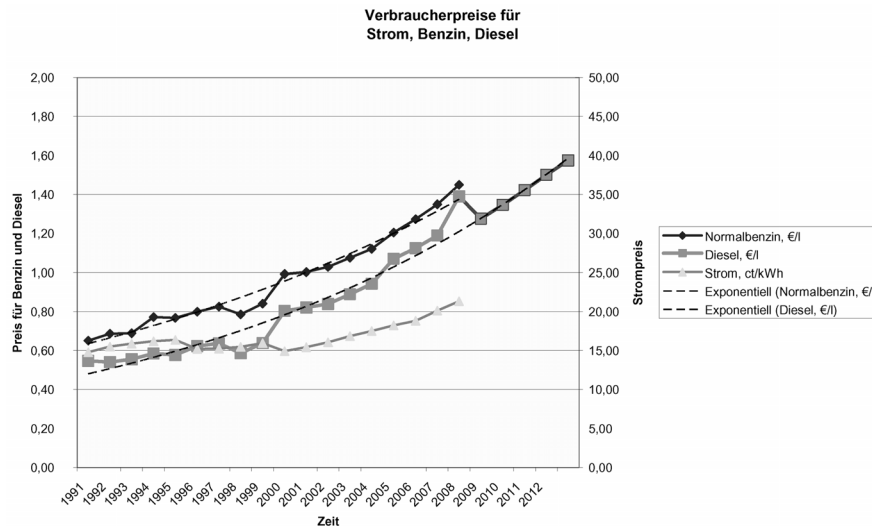


Abb. 1: Anstieg der Energiepreise in den letzten 20 Jahren (Quelle: BMWi, bearbeitet IMAB).

Die Maximalförderquote („peak oil“) ist bereits erreicht oder wird bald erreicht sein. Unter diesen Voraussetzungen wird sich fossile Energie auch wegen der zunehmenden Nachfrage aus China und Indien stetig verteuern. Bild 1 zeigt die Preisentwicklung von Benzin, Diesel und Strom der letzten 20 Jahre, wobei die erdölbasierten Kraftstoffe einen stetigen Anstieg mit gewissen spekulationsbedingten Schwankungen aufweisen. Die Näherung mit einer Exponentialfunktion lässt vermuten, dass sich der Preisanstieg noch beschleunigen wird. Strom zeigt dagegen ein weniger stetiges Verhalten, was im Wesentlichen auf die Einflüsse infolge der Deregulierung und Liberalisierung des Strommarktes zurückzuführen ist. Erst seit 2000 ist ein stetiger Anstieg des Strompreises ähnlich wie bei den Kraftstoffpreisen zu verzeichnen. Damit bleibt jedoch die Differenz zwischen Kraftstoffpreis und Strompreis erhalten bzw. wird absolut sogar größer.

Während im betrachteten Zeitraum von 1991 bis 2008 die Preise für erdölbasierte Energie um ca. 100% angestiegen sind, haben sich dagegen die Lebenshaltungskosten und das BIP nur um ca. 30% erhöht, was bedeutet, dass ein immer größerer Anteil des Einkommens für Energiekosten aufgewendet werden muss. Ein volkswirtschaftlich wichtiger Vorteil der Elektromobilität wäre deshalb eine weitaus größere Unabhängigkeit des Verkehrssektors von den fossilen Energieträgern Öl und Gas, die zu mehr als 90% importiert werden müssen. Strom und auch Wasserstoff müssen nicht aus Öl oder Gas erzeugt werden, sie könnten im Idealfall aus regenerativen Quellen kommen.

3. Potentiale von Elektrofahrzeugen

Bereits beim heutigen Stand der Technik könnten Elektrofahrzeuge als Zweitfahrzeuge, die vor allem im Kurzstreckenverkehr in den Städten eingesetzt werden, eine wichtige Rolle spielen, denn

- 72% aller Fahrten erfolgen mit Entfernungen unter 50 km, überwiegend im Stadt- und ländlichen Nahbereich,
- 53% der Haushalte besitzen mehr als ein Auto, Fahrten in der Stadt und im Nahbereich könnten mit diesem Zweitwagen elektrisch abgedeckt werden,
- aufgrund des niedrigeren Energieverbrauches und des günstigeren Strompreises sind die Betriebskosten des Elektrofahrzeuges deutlich geringer als die eines konventionellen Fahrzeugs,
- die Wartungskosten eines Elektroantriebes sind vernachlässigbar niedrig. Es entfallen beispielsweise der Öl- und Ölfilterwechsel und der vorsorgliche Austausch diverser Keil- und Zahnriemen,
- die Antriebe sind sehr langlebig. Es könnten langlebigere Fahrzeuge konstruiert oder eine Austauschtechnologie aufgebaut werden.

Gegenüber dem Antrieb mit Verbrennungskraftmaschine zeichnet sich der Elektroantrieb durch die folgenden Betriebseigenschaften aus:

- Volles Drehmoment bei Drehzahl Null verfügbar, das maximale Moment wird nur durch die Sättigung des Eisenkreises begrenzt.
- Wesentlich höhere Dynamik (Drehmomentanregelzeit in Millisekunden).
- Wechsel vom motorischen in den generatorischen Betrieb und damit Rekuperation von Bremsenergie problemlos möglich.
- Sehr guter Wirkungsgrad (ca. 90%).
- Geräuscharm (weniger Dämmmaterial erforderlich).
- Die Antriebe sind beliebig skalierbar, die Auslegungsparameter Anfahrtdrehmoment und max. Leistung sind nur durch den Energiespeicher begrenzt.

Allerdings ist zu beachten, dass bei Elektrotraktion der CO₂ Ausstoß erst einmal in das Kraftwerk verlagert ist und somit vom aktuellen Strommix abhängt (Bild 2). Wie aus der Energiebilanz in Bild 2 erkennbar ist, gilt: Erst wenn die Energie für die Elektromobilität aus regenerativen Quellen bezogen werden kann, ist eine nennenswerte CO₂ Reduktion möglich (Kernenergie wurde hier ausgeblendet, da sie im aktuellen politischen Konsens auch mit verlängerter Laufzeit nur eine Übergangsenergie darstellt und damit für die Elektromobilität langfristig keine Rolle spielen dürfte. Statt CO₂ wird hier strahlender Müll „emittiert“, dessen Entsorgung nach wie vor ungeklärt ist).

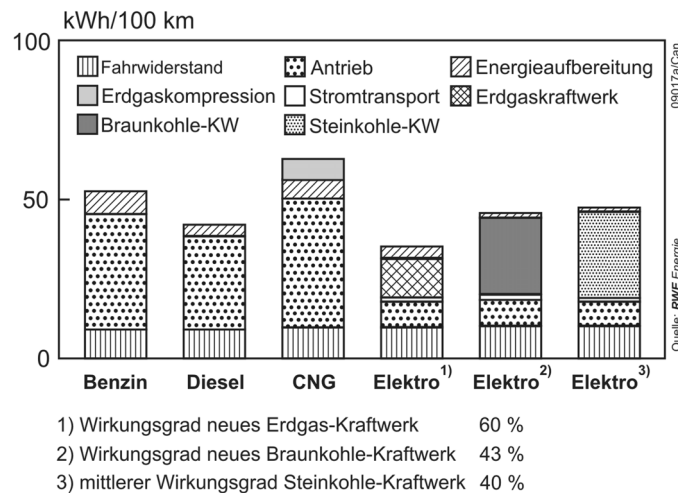


Abb. 2: Primärenergieverbrauch fossiler Energieträger bei verschiedenen Antriebstechnologien.

Analoge Aussagen gelten auch für Brennstoffzellen Fahrzeuge, da der Wasserstoff erst unter Einsatz von Primärenergie bzw. der Sekundärenergie Strom hergestellt werden muss.

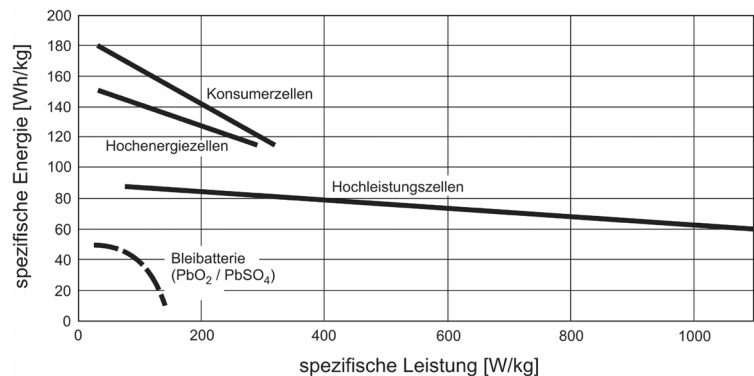
4. Technische Aufgabenstellungen/Forschungsthemen

4.1. Batterietechnik

Bei den Batterien für Traktionsanwendungen geht man heute üblicherweise von Li-Ion Batterien aus, da nur diese aufgrund ihrer hohen spezifischen Energie- und Leistungsdichte und ihres hohen Zykluswirkungsgrades Fahrzeuge mit akzeptablen Fahrleistungen ermöglichen. Gegenüber den herkömmlichen Bleibatterien konnte durch die Li-Ion Technik die Energiedichte um ungefähr das dreifache, die Leistungsdichte sogar um das zehnfache gesteigert werden (Bild 3). Dies ermöglicht Leistungsreserven, die sowohl das problemlose Mitschwimmen im fließenden Verkehr als auch erheblichen Fahrspaß durch hohe Beschleunigung gestatten.

Im Vergleich zu einem Kraftstofftank ist der spezifische Energieinhalt einer Li-Ion Batterie auch bei Berücksichtigung des höheren Antriebswirkungsgrades fast um den Faktor 50 kleiner (Bild 4). Dies impliziert eine massive Einschränkung der Reichweite des Fahrzeugs und eine Änderung des Nutzerverhaltens, deren Konsequenz nur sehr schlecht abgeschätzt werden kann. Obwohl 72%

aller Fahrzeuge weniger als 50 km pro Tag zurücklegen, ist ein stark reichweiten-eingeschränktes Fahrzeug selbst mit dann preiswerter Batterie am Markt wahrscheinlich nur schwer absetzbar.



Zul. Entladestrom bei Hochenergiebatterien: Typisch 2C Rate
Zul. Entladestrom bei Hochleistungsbatterien: Typisch 10C-30C Rate

Abb. 3: Ragone Diagramm: Aktueller Stand der Li-Ion Technologie – Vergleich mit Bleibatterie (C Rate: Auf die Kapazität bezogener Entladestrom, z.B. bei einer 1Ah Batterie bedeutet 10C Rate 10A Entladestrom).

Der auf den ersten Blick erstaunliche Umstand, dass die Konsumerzellen (Mobiltelefon, Lap Top) die höchsten Energiedichten haben, erklärt sich aus deren geringerem Gewicht, das – wie die Erfahrung zeigt – durch Verkürzung der Lebensdauer erkaufte wird.

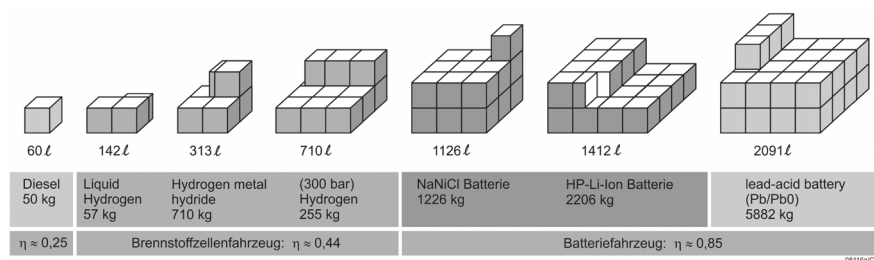


Abb. 4: Vergleich von Speichergewicht und Volumen bezogen auf einen 60 l Dieseltank.

Als vermutlich für Nutzer akzeptable Reichweite geht man heute von 120 bis 200 km aus, die mit einer Batterieladung zu erreichen wären. Dies setzt bereits

entsprechend kostengünstige Batterien voraus. Darüber hinaus gehende Reichweiten werden vorerst wohl nur mit zusätzlichem Ladeaggregat („Range Extender“) an Bord des Fahrzeugs zu erreichen sein, das sich wiederum auf Öl oder Erdgas abstützt.

Zur Bestimmung der Reichweite wird i. Allg. der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) verwendet, der einen sehr moderaten Betrieb des Fahrzeugs im Stadtverkehr abbildet. Bei praxisnäherer, etwas flotterer Fahrweise kann von einer Reduzierung der Reichweite auf die Hälfte ausgegangen werden. Ein weiterer Effekt ist die nun relativ hohe Belastung des Energiespeichers durch die Hilfsantriebe des Fahrzeugs, wie Klimakompressor, Heizungsgebläse, Kühlmittelpumpe und die Heizenergie selbst, die bei einem konventionellen Fahrzeug praktisch kaum ins Gewicht fielen. Auch diese Energieverbraucher können die Reichweite nahezu halbieren.

Die spezifische Leistungsdichte heutiger Li-Ionen Zellen ist dagegen so groß, dass bei üblichen Fahrzeugnutzungsprofilen auf zusätzliche Spitzenlastspeicher wie Superkondensatoren oder Schwungmassenspeicher verzichtet werden kann. Für unterschiedliche Anwendungen steht heute eine Vielzahl von verschiedenen Kompositionen der Zellchemie zur Verfügung, die von Hochleistungs- bis zu Hochenergiebatterien unterschiedliche Anforderungsprofile abdecken.

Tabelle 2: Abschätzung von Batteriegröße und Kosten für ein typisches Stadtfahrzeug. (Als Batteriekosten sind prospektive Werte angesetzt, wie sie vielleicht in 2020 vorliegen könnten, das heutige Kostenniveau liegt um den Faktor 3–4 höher.)

| | |
|-------------------------------------|---|
| Reichweite: | 150 km (NEFZ) |
| Energiebedarf: | 25..30 kWh (abh. von Masse und Fahrwiderständen) |
| Spannung: | U=300 V |
| Kapazität: | 100 Ah (Ladung mit 1C: 30 kW Ladegerät) |
| Li-Ion Hochleistungsbatterie | -sportliches Stadtfahrzeug - |
| Batteriemasse (80 Wh/kg) | 312..375 kg |
| Batterievolumen (280 Wh/l) | 90..110 l |
| Kosten (0,3 \$/Wh) | 7500..9000 \$ entspr. 6000..7000 € |
| Betriebskosten | Beispiel: Abschätzung für 100 km Fahrstrecke im NEFZ |
| Energiebedarf Elektrofahrzeug | 15 - 20 kWh \Rightarrow 3-4 € |
| Sparsames Fahrzeug mit Ottomotor | ca. 5 l pro 100 km \Rightarrow 6-7 € |

In Zusammenhang mit der Batterie sind weitere offene Fragen zu klären:

- Li-Batterien verlieren bei tiefen Temperaturen ihre Leistungsfähigkeit (org. Elektrolyt). Heizung und ggfs. Wärmespeicher sind erforderlich. Bei hoher Leistungsentnahme wird eine Kühlung benötigt, um Überhitzung und Zersetzung des Elektrolyten zu vermeiden.
- Die Rohstoffproblematik ist nicht vollständig geklärt (Zugänglichkeit der verfügbaren Li-Vorräte) – bei einigen Batterietypen kommen seltene u. teure Elektrodenmaterialien (Kobalt) zum Einsatz.
- Noch unklare Recyclingprozesse (aktuelle Forschung an TU-BS).
- Automatisierte Fertigung von Batterien
 - mit großer Kapazität (50-80Ah)
 - für „automotive“ Stückzahlen und
 - mit reproduzierbarer Qualität muss noch etabliert werden (s. Tagespresse, Toshiba, LiTec).

Diese Betrachtungen legen nahe: Reine Elektrofahrzeuge werden auf absehbare Zeit keine Langstreckenfahrzeuge sein. Die Herausforderungen auf der Batterie-seite liegen in der Weiterentwicklung der Batteriechemie. Der „heilige Gral“ ist hier die Lithium Metall Batterie mit einer Sauerstoff/Luftelektrode. Mit solchen Systemen könnte eine Energiedichte von 1000 Wh/kg erreicht werden, was die meisten der heutigen Probleme lösen würde. Allerdings müssten auch die Sicherheitsfragen für solche Batterien (Unfall, Fehlbedienung, Kurzschluss usw.) neu gelöst werden. Gerade kürzlich hat IBM angekündigt, auf diesem Gebiet ein großes Forschungsprogramm auflegen zu wollen (VDI Nachrichten, im Jan. 2010).

Das hohe Batteriegewicht erfordert Gewichtsreduktionsmaßnahmen auf der Fahrzeugseite, um die Energiebilanz näherungsweise neutral zu halten. Dabei sind die heute üblichen Anforderungen an die passive Sicherheit des Fahrzeugs einzuhalten. Auf diesem Gebiet wird zur Zeit in der Autoindustrie und an verschiedenen Forschungsstellen (z.B. NFF) gearbeitet.

4.2. Antriebstechnik

Im Vergleich zu den Batterieproblemen stellen sich die Aufgaben auf der Elektroantriebsseite als vergleichsweise einfach dar. Der Schwerpunkt muss auf einer Antriebstechnik liegen, die den begrenzten Energievorrat optimal ausnutzt. Bei den Fahrzeugantrieben hat sich deshalb ausnahmslos die Drehstromantriebstechnik mit Synchron – und Asynchronmotoren durchgesetzt.

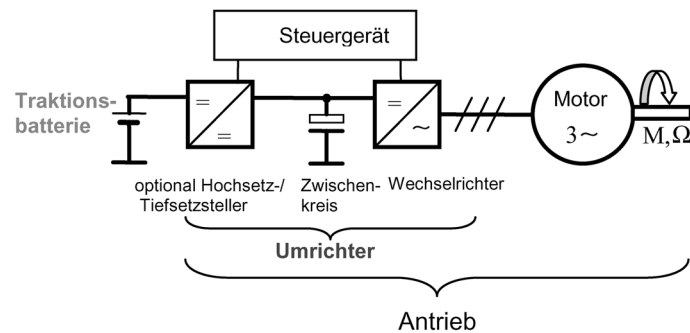


Abb. 5: Typische Antriebsstruktur für einen Elektrofahrzeugantrieb.

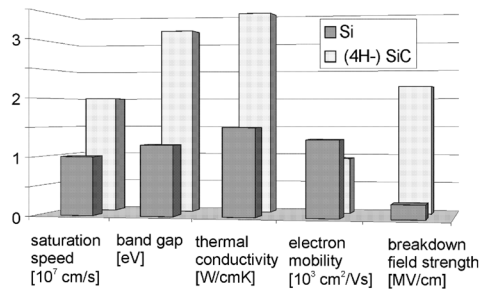
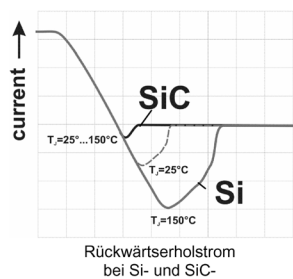
Festzuhalten ist, dass das Wirkungsgradniveau heutiger elektrischer Drehstromantriebe bereits sehr hoch ist, so dass Steigerungen auf diesem Gebiet den Energieverbrauch nur noch geringfügig beeinflussen. Eine weitaus größere Rolle dürfte die Gewichtsreduzierung unter der Nebenbedingung eines weiterhin hohen Wirkungsgrades des Antriebes spielen. Hier liegt ein Schwerpunkt der Arbeiten am IMAB. Bei entsprechend optimierter Auslegung sind heute Leistungsdichten von 3-5 kW/kg Aktivmaterial durchaus zu erreichen. Durch eine hoch integrierte Bauweise von E-Maschine und Getriebe kommt man so zu kompakten und leichten Antriebseinheiten, mit denen ein Teil des zusätzlichen Batteriegewichtes kompensiert werden kann. Bezüglich des Einbauvolumens von Wechselrichter und Motor ist ein Kompromiss zwischen Platzbedarf und Austauschbarkeit im Reparaturfalle zu finden, der am Ende den Integrationsgrad dieser Einheiten in die Fahrzeugstruktur bestimmen wird.

Angesichts der in Elektrofahrzeugen erforderlichen Leistungen von $P_N = 60..150$ kW geht der Trend bezüglich des Spannungsniveaus zur klassischen Industriespannung mit $U_d = 400$ V. Die große Differenz zwischen den Spannungen beim Laden (Rekuperation) und Entladen hat eine starke Schwankung der Zwischenkreisspannung zur Folge, ermöglicht jedoch bei diesem Spannungsniveau trotzdem den Einsatz schnell schaltender Leistungshalbleiter mit Sperrspannungen von 1200 V. Die Spannungsschwankungen können durch den in Bild 5 angedeuteten Hoch-/Tiefsetzsteller ausgeglichen werden, der aber auch die Gewichtsbilanz negativ beeinflusst. Alternativ muss die Bemessung des Fahrmotors für die untere Spannungsgrenze erfolgen, was jedoch das Motorgewicht erhöht. Dies ist eine klassische Optimierungsaufgabe.

Prinzipiell können für die Entwicklung der Leistungselektronik ausgereifte Schaltungstopologien und Leistungshalbleiter aus Industrieanwendungen übernommen werden. Nachteilig ist die Temperaturbegrenzung der Siliziumtechno-

Hauptvorteile:

- Großer Bandabstand 2.3 eV..3.2 eV (Si: 1.1eV)
- Weitere Temperaturgrenzen
- Höhere thermische Leitfähigkeit
- Höhere Sättigungsgeschwindigkeit
- Weniger gespeicherte Ladungsträger

**Bei Komponenten:**

- Höhere elektrische Durchbruchfeldstärke
- Höherer Temperaturbereich
- Besseres Schaltverhalten, geringere Verluste
- Geringerer Leckstrom
- Höhere Schaltfrequenzen



Abb. 6: Eigenschaften von Silizium Carbide Halbleitern.

logie, bei der nur wenig mehr als 170°C Chiptemperatur zulässig sind, was Masse und Volumen der leistungselektronischen Komponenten ungünstig beeinflusst. Fortschritte sind hier durch neuartige Halbleiterwerkstoffe mit größerem Bandabstand zu erwarten, wie z.B. Silizium Carbide (SiC, Bild 6). In der Anwendung solcher Bauelemente liegt ein Arbeitsschwerpunkt der Leistungselektronikgruppe des IMAB [6, 7]. Durch das nun mögliche höhere Temperaturniveau können die leistungselektronischen Komponenten leichter und kompakter aufgebaut sowie Kühlkörper und Wärmetauscher verkleinert werden. Der Wirkungsgrad der Wechselrichter liegt bereits mit Si Technologie mit 95..97% auf einem sehr hohen Niveau, gleichwohl ist die Abfuhr der anfallenden Verlustwärme nicht trivial und erfordert ein sehr sorgfältiges Design des Wechselrichterbaus. Hauptproblem ist die Beherrschung der thermischen Differenzdehnungen im Modulaufbau, da Silizium, Keramiksubstrat, Lot und Kupfer sehr unterschiedliche Wärmedehnungen aufweisen. Erst durch die Beherrschung der Temperaturverteilungen in den Schichten des Moduls und zuverlässige Bonddrahtverbindungen oder Druckkontaktierung wird eine ausreichend hohe Lebensdauer erreicht.

Die Antriebsstrukturen für ein Elektrofahrzeug können sehr stark variieren, da man nun die Möglichkeit hat, die Antriebsleistung auch auf mehrere Motoren aufzuteilen.

Tabelle 3: Systematik der Antriebsanordnungen

| Antriebsstruktur | | | EM vor Getriebe | EM vor Differential | EM radnah |
|------------------------|----------------|---------|--------------------|---------------------------|-----------|
| Zentramotor | Karosseriefest | | X | X (auch als Transaxle) | |
| Mehrmotoren Antrieb | Karosseriefest | | | | X |
| | Radfest | Gondel | | | X |
| | | Radnabe | | | X |

Ebenso kann die Anordnung der Motoren im Fahrzeug vom Zentramotor mit Getriebe (Bild 7) bis zum direkt antreibenden Radnabenmotor reichen. Einen Überblick über die Varianten geben Tabelle 3 und Bild 8.

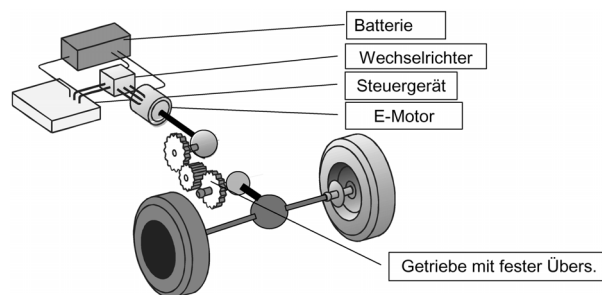


Abb. 7: Conversion Design. Elektroantrieb als Austauschaggregat.

Weitere Varianten ergeben sich aus der Kombination der Motoren mit den Wechselrichtern. Die Anzahl der insgesamt erforderlichen Wechselrichter richtet sich nach den Freiheitsgraden, die für die Antriebsregelung gewünscht werden und nach der Art der verwendeten Maschinen.

Ordnet man jedem Elektromotor einen Wechselrichter zu, so hat man alle technisch möglichen Freiheitsgrade für die Antriebsregelung und kann sowohl Synchron- als auch Asynchronmaschinen verwenden. Mit Asynchronmaschinenantrieben sind jedoch auch vereinfachte Antriebsstrukturen in Form von Mehrmotorenantrieben vorstellbar, bei denen leicht unterschiedliche Drehzahlen an den Rädern über den Schlupf der Motoren ausgeglichen werden können.

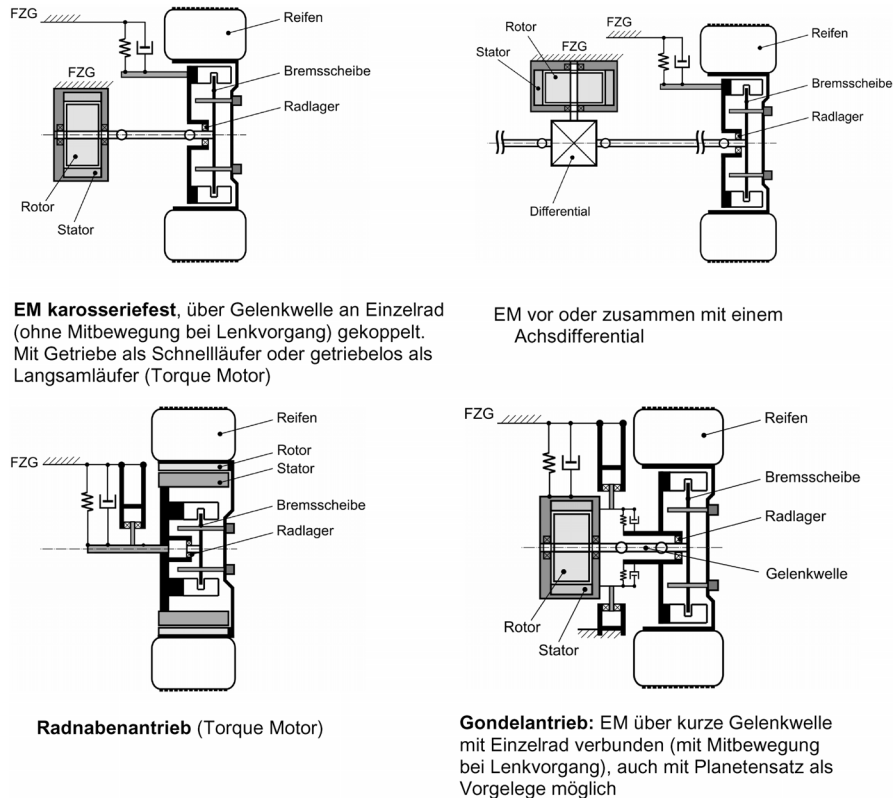


Abb. 8: Beispiele für die Anordnung der Motoren im Fahrzeug.

Durch die höhere Flexibilität in der Gestaltung der elektrischen Antriebe hat man auch hinsichtlich der Karosseriekonstruktion mehr Freiheitsgrade. Ebenso kann die Anordnung des Energiespeichers und der nicht mit den Rädern verbundenen Antriebskomponenten wesentlich freier gewählt werden.

Bei den Elektromotoren liegt heute bereits eine gute Übersicht über die möglichen Lösungsansätze vor. Bild 9 gibt eine vereinfachte Übersicht über die bekannten Varianten. Synchronmaschinen überraschen hier durch eine große Variantenvielfalt des magnetischen Kreises, die auch noch kontinuierlich anwächst (inzwischen mehr als 100), und werden bevorzugt als Permanentmagnet erregte Maschinen eingesetzt. Gegenüber Asynchronmaschinen zeichnen sie sich durch bessere Wirkungsgrade im Konstantmomentbereich aus (Bild 10). Neueste Entwicklungen mit eingebetteten Magneten erlauben auch bessere Wirkungsgrade bei hohen Drehzahlen im Konstantleistungs- oder Feldschwäcbereich.

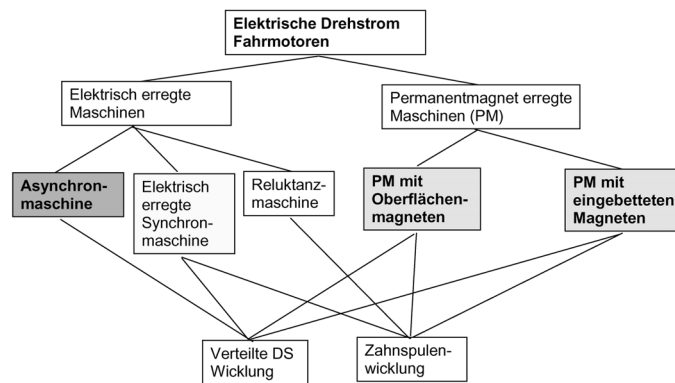
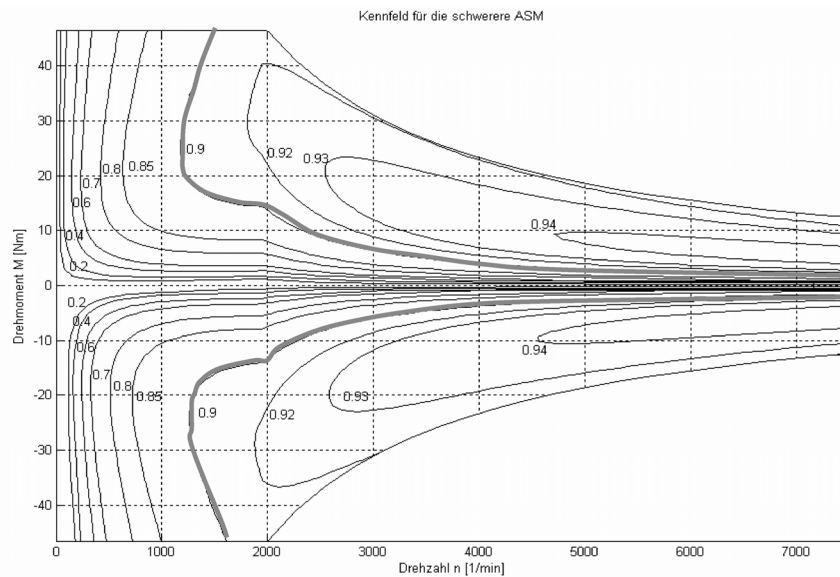


Abb. 9: Vereinfachte Übersicht über die möglichen Drehfeldmaschinen.

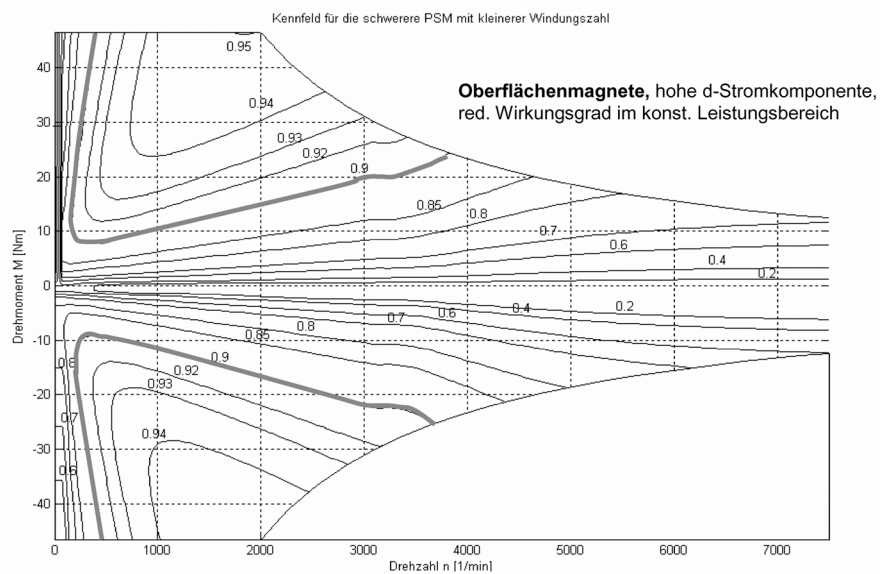
Eine interessante Variante stellen Synchronmaschinen mit sog. Zahnspulenwicklungen (Spulenweite kleiner als die Polteilung, Spulen auf je einen Statorzahn gewickelt) dar, die wegen ihrer extrem kleinen Wickelköpfe deutlich weniger Ständerverluste und wegen der erreichbaren kleinen Polteilungen auch eine hohe Ausnutzung des aktiven Materials gestatten. Die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten solcher Maschinen ist ein Themenschwerpunkt am IMAB [8, 9, 10].

Die beiden in Bild 10 dargestellten typischen Wirkungsgradkennfelder mit der hervorgehobenen 90% Linie stehen beispielhaft für die Bandbreite der Möglichkeiten, das Wirkungsgradoptimum im Drehmoment-Drehzahlkennfeld zu beeinflussen. Bei der Asynchronmaschine ist typischerweise bei niedrigen Drehzahlen und hohen Drehmomenten mit einer Wirkungsgradverschlechterung zu rechnen, während bei hohen Drehzahlen sehr gute Wirkungsgrade erreicht werden. Durch eine Auslegung mit Spannungs- und Flussreserve sowie eine optimierte Wechselrichterspeisung lässt sich diese Situation jedoch noch optimieren [11]. Das Kennfeld der Permanentmagnet erregten Synchronmaschine mit Oberflächenmagneten stellt dagegen das andere Extrem dar: Hier ist das Wirkungsgradkennfeld im unteren Drehzahlbereich günstiger, jedoch fällt der Wirkungsgrad bei höheren Drehzahlen im Feldschwäcbereich ab, weil immer mehr Strom zur Entmagnetisierung der Maschine aufgewendet werden muss. Zwischen diesen beiden Extremen lässt sich durch eine große Anzahl konstruktiver Varianten eine anwendungsorientierte Optimierung vornehmen.

Eine typische Eigenschaft aller Synchronmaschinenkonzepte mit Permanentmagneterregung ist die Tatsache, dass sie prinzipbedingt nur bei Drehzahl Null keine induzierte Spannung aufweisen. Dies erfordert besondere Aufmerksam-



a) Asynchronmaschine



b) Synchronmaschine mit Permanentmagneterregung

Abb. 10: Typische Wirkungsgradkennfelder für Asynchron- und Synchronmaschinen.

keit bei der Auslegung des Antriebes für Störfälle wie Controllerausfall, Windungsschluss und Abschleppbetrieb und schränkt die zweifellos vorhandenen Vorteile der Permanentmagnetenerregung wieder ein. Elektrisch erregte Synchronmaschinen oder Asynchronmaschinen lassen sich dagegen komplett spannungsfrei machen.

Hinsichtlich der Kühlung der Elektromotoren geht man heute üblicherweise von einer relativ einfach gestalteten Wassermantelkühlung aus. Diese reicht bereits aus, um die erwähnten Ausnutzungswerte der Maschinen zu erreichen. Bezüglich des Wasserkreislaufs wird auf im Automobilbau eingeführte Technologien zurückgegriffen. Allerdings wird das Temperaturniveau des Kühlkreislaufes mit 60 bis 70°C deutlich niedriger liegen als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Bei tiefen Umgebungstemperaturen haben Elektromaschine und Leistungselektronik keine größeren Schwierigkeiten, wenn alle Konstruktionselemente mit ihren Passungen an die im Automobilbereich üblichen Temperaturen angepasst sind. Die Methoden hierfür sind bekannt.

Dieser kurze Einblick in die enorme Vielfalt der Möglichkeiten zur Antriebsgestaltung macht verständlich, warum sich die Automobilhersteller mit der Festlegung auf ein langfristig tragfähiges Antriebskonzept noch so schwer tun. Die Forschungsschwerpunkte werden in der Untersuchung von Antriebsstrukturen mit hohem Wirkungsgrad unter Ausschöpfung aller Freiheitsgrade der elektrischen Antriebstechnik (Stichworte: Zentralantrieb oder Mehrmotorenantrieb), in der Entwicklung von Magnetkreisen mit großem Feldschwäcbereich und in der Entwicklung kompakter, EMV stabiler Wechselrichtereinheiten und Schaltgeräte zu sehen sein. Auch die Fertigungstechnologie von Antriebsmotoren für die im Automobilbau üblichen Stückzahlen stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Hinzu kommt die Regelung des Antriebssystems unter Einbindung der Batterie und ihrer speziellen Sicherheitsanforderungen sowie die Beherrschung aller denkbaren Fehlerszenarien von Antrieb und Fahrzeug. Gerade Mehrmotorenantriebe eröffnen hier ein interessantes Forschungsfeld für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit auf den Gebieten Karosseriegestaltung/Karosserieleichtbau und Fahrzeuglängs- und Querdynamik. Dieser Gedanke spiegelt sich auch im Konzept des Niedersächsischen Zentrums für Fahrzeugforschung (NFF) wieder.

Ausblick

Bei aller Begeisterung für die technische Machbarkeit von Elektrofahrzeugen sollte man jedoch nicht vergessen, dass sowohl Kauf als auch Nutzung von Fahrzeugen im Individualverkehr weniger nach nüchternen, ökonomisch-logischen Überlegungen erfolgen als nach subjektiven und gefühlsbetonten Regungen. Eine große Rolle hierbei spielt die Illusion subjektiver Freiheit durch

das Automobil sowie hiermit zusammenhängend die Möglichkeit der spontanen Nutzung des Fahrzeugs. Bereits die Nutzung eines öffentlichen Verkehrsmittels erfordert im Vergleich hierzu schon eine gewisse Vorausplanung, so dass häufig das Individualfahrzeug als bequemer angesehen wird, obwohl dann in den Städten exorbitante Parkgebühren zu zahlen sind.

Bei Elektrofahrzeugen wird man jedoch eine vergleichbare Vorausplanung mit Einschätzung der zurücklegbaren Entfernung und der auf der Strecke verfügbaren Lademöglichkeiten machen müssen. Es ist zur Zeit daher reine Spekulation, ob beim jetzigen Stand der Batterietechnik das Elektrofahrzeug beim Verbraucher die notwendige Akzeptanz findet, um einen nennenswerten Beitrag zur CO₂ Einsparung zu leisten.

Eine große Rolle bei der zukünftigen Entwicklung wird die Entwicklung der Kraftstoffpreise spielen. Diese haben, wie die Erfahrungen auf dem amerikanischen Markt und in jüngster Zeit auch in Europa zeigen, einen erheblichen Einfluss auf das Verbraucherverhalten. Noch wichtiger ist jedoch der Fortschritt bei der Batterieentwicklung, an dem weltweit gearbeitet wird und dessen zeitlicher Verlauf nicht abzusehen ist.

Die eingangs gestellte Frage nach der Zukunft der Elektrofahrzeuge kann daher nur mit einem ja, aber... beantwortet werden. Auf dem Weg zur Elektromobilität wird es somit eine Reihe von Übergangslösungen mit zunehmender Elektrifizierung geben, z.B. Hybrid- und Plug-In-Hybrid Fahrzeuge sowie weiter Elektrofahrzeuge mit zusätzlichem Ladegenerator (Range Extender). Während Hybridfahrzeuge und die nachfolgenden höher elektrifizierten Fahrzeuggenerationen ihre Energiebilanz noch zu 100% aus dem Tank mit fossilen Energieträgern oder später teilweise über das elektrische Versorgungsnetz und teilweise den Tank abdecken, müssen Elektrofahrzeuge ihre Energie komplett aus dem elektrischen Versorgungsnetz beziehen. Solange mit moderaten Leistungen (3kW Haushaltssteckdose) geladen wird, stellt dies kein nennenswertes Problem dar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass zusätzlich Bedarf an Schnellladestationen besteht, um das Fahrzeug während kürzerer Fahrtunterbrechungen (z.B. Besuch von Einkaufszentren) aufzuladen. Dies stellt dann schon erhebliche Anforderungen an die Netzinfrastruktur, die noch zu klären sind.

In diesem Aufsatz wurden die Betrachtungen auf Batteriefahrzeuge beschränkt, die Antriebsstruktur eines Brennstoffzellenfahrzeuges wäre jedoch ähnlich, so dass sich solch ein Fahrzeug vom Elektrofahrzeug nur durch die andere Energiespeicherstruktur aus H₂ Tank, Brennstoffzelle und chemischer Batterie für die Rekuperation unterscheiden würde. Vorteilhaft wäre hier die Möglichkeit eines wesentlich schnelleren Auftankens. Problematisch und nicht befriedigend geklärt sind jedoch die ökonomischen Aspekte des Brennstoffzellenaggregates und die Infrastrukturprobleme. Eine Wasserstoffinfrastruktur müsste extra auf-

gebaut werden, während eine Stromversorgungsinfrastruktur bereits besteht und einfacher ausgebaut werden könnte.

Zusammenfassung

Elektromobilität tut not! In Abwandlung des bekannten Zitates von R. Kienau kann festgehalten werden, dass die Notwendigkeit zur Emissionsreduktion und abnehmende Ressourcenverfügbarkeit vor allem beim Erdöl eine Änderung der Mobilitätstechnologie erfordern. Damit eröffnen sich für die Gestaltung der Fahrzeuge neue Möglichkeiten und erhebliche Innovationspotentiale. Die eigentliche Schlacht wird jedoch auf dem Energiespeichersektor ausgefochten. Die wünschenswerte, positive Weiterentwicklung des Elektrofahrzeuges hängt ganz wesentlich von der Entwicklung auf dem Batteriesektor und alternativ hierzu von den Brennstoffzellen ab. Hier sind noch erhebliche Forschungsanstrengungen im Bereich der Grundlagenforschung notwendig.

Auf der antriebstechnischen Seite kann festgestellt werden, dass bereits heute brauchbare Antriebslösungen mit hohem Wirkungsgrad darstellbar und an jede Form von Energiespeicher anpassbar sind. Forschungsaufgaben liegen hier eher in Detailproblemen sowie in der Fertigungstechnologie der Elektrokomponenten für im Automobilbau übliche Stückzahlen. Bei der Stromversorgungsinfrastruktur ist festzuhalten, dass die Energieversorger vorerst kein größeres Problem in der Bereitstellung der zum Laden der Fahrzeuge erforderlichen Energiemengen sehen. Notwendig ist jedoch, die Elektrofahrzeuge durch regenerative Energie zu versorgen, da sonst keine nennenswerten Emissionen eingespart, sondern diese nur verlagert werden. Dies erfordert wiederum längerfristige Änderungen der Versorgungsinfrastruktur hin zu einem deutlich größeren Energiespeicheranteil zum Ausgleich der Differenz zwischen Energieangebot und Nachfrage in den Netzen.

Literatur

- [1] Nationale Strategiekonferenz Elektromobilität der Bundesregierung, *Sachstand und Eckpunkte zum Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität*, 19. November 2008.
- [2] European Commission, Climate Change (http://ec.europa.eu/environment/climat/home_en.htm)
- [3] KREWITT, WOLFRAM, *Scenarios of a future decentralised energy supply*, Symposium Decentralised Energy Systems, Oldenburg, 15./16.02.2007
- [4] *Sachstand und Eckpunkte zum Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität*, Berlin 2008 (http://www.elektromobilitaet2008.de/konferenz/sachstand-und-eckpunkte-des-nationalenentwicklungsplans/at_download/file).

- [5] TSCHIRSCHKE, MARTIN: *Peak Oil ist da: Das Ende der billigen Energie ist erreicht*; Magazin Erneuerbare Energien, Ausgabe August 2008 (http://www.erneuerbareenergien.de/0808/ere08-08_s64-65.pdf).
- [6] KOCH, I. & W.-R. CANDERS: *Discussion of turn on current peaks of SiC switches in half bridges* 8th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, ICSCRM 2009, Oct 11-16. 2009, Nürnberg, Germany.
- [7] KOCH, I. & W.-R. CANDERS: *Comparison of SiC-JFET and Si-IGBT Inverters* 7th European Conference on Silicon Carbide and related Materials, ECSCRM, 7.-11. Sept. 2008, Barcelona, SP.
- [8] CANDERS, W.-R., H. MOSEBACH & M.R. REZAEI: *Versatile High Torque Direct Drive with PM-Excitation and Duplex Stator Arrangement*, ICEM 2006, Int. Conference on electrical machines, Sept. 2-5th, 2006, Chania, Crete, GR.
- [9] CANDERS, W.-R. & M.R. REZAEI: *PM Excited Polyphase Machine with low Inertia*, ICEM 2006, Int. Conference on electrical machines, Sept. 2-5th, 2006, Chania, Crete, GR.
- [10] MAY, H., J. MEINS, W.-R. CANDERS & R. PALKA: *New permanent magnet excited synchronous machine with extended stator fixed auxiliary excitation coil*, ISEF 2009 – XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Arras, France, September 10-12, 2009.
- [11] MAY, H., W.-R. CANDERS & N. LESCOW: *Leistungssteigerung der ASM durch optimierte Wechselrichterspeisung*, Haus der Technik Tagung, Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, 24.-25.3.2009, München, Haus der Technik Fachbuch 102, Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid und Elektrofahrzeuge, expert Verlag, ISBN 978-3-8169-2900-0.